

بررسی آزمایشگاهی اثر دانه‌بندی ماسه و عیار سیمان بر روی

مشخصات مکانیکی ملات‌های بنایی

وحید بانسی^۱، مختار روشن ضمیر^۱، سید مهدی دهقان^۲، محمد امیر نجفقلی پور^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی شیراز

vahidcpp@gmail.com

چکیده

ملات ماده‌ای است که عامل اصلی پیوستگی و انتقال تنش در ساختمان‌های بنایی می‌باشد. آگاهی از مشخصات مکانیکی ملات سخت برای اطمینان از عملکرد مناسب دیوارهای بنایی ضروری است. ماسه حجم زیادی از ملات را در برمی‌گیرد که به‌صورت سنتی در ساخت ملات بر اساس مصالح موجود بکار می‌رود. از نکات مهم در کاربرد ماسه در ملات‌های بنایی دانه‌بندی ماسه طبق استاندارد است. مقدار سیمان مصرفی و همچنین دانه‌بندی ماسه از متغیرهایی است که بر کارایی و رفتار ملات تأثیر مستقیم دارد. در این پژوهش بر اساس روش‌های آزمایشگاهی ارائه‌شده در استانداردهای معتبر، تأثیر دانه‌بندی ماسه و مقدار سیمان مصرفی روی مشخصات مکانیکی ملات مورد ارزیابی قرار گرفت. ۱۲ حالت ملات به شرح سه عیار ملات ماسه-سیمانی و سه عیار ملات ماسه-سیمان-آهک (باتارد) با دو نوع ماسه ریز و درشت در نظر گرفته شد. نمونه‌های استاندارد برای تعیین مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول ارتجاعی در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی شیراز آزمایش شدند و نتایج تحلیل ارزیابی شد. علاوه بر ارائه رابطه مقاومت فشاری-مقاومت خمشی و مقاومت فشاری-مدول ارتجاعی، نتایج نشان داد که مقاومت فشاری و خمشی ملات‌ها با کاهش عیار سیمان به ماسه در هر دو نوع ملات ماسه سیمانی و ماسه سیمان آهکی کاهش می‌یابد و همچنین ملات‌های مشابه با دانه‌بندی ریز مقاومت فشاری و خمشی به‌مراتب کمتری نسبت به ملات با دانه‌بندی درشت دارند.

کلمات کلیدی: ملات، عیار سیمان، دانه‌بندی ماسه، مشخصات مکانیکی.

Abstract

In masonry buildings, mortar provides bonding and stress transition mechanism. Finding mechanical properties of hardened mortar is necessary for evaluating performance of masonry walls. Mortars mostly consist of sand which is traditionally provided from available sources. One of key points of using appropriate sand in mortar is standard grading of sand. In this experimental research, effect of sand grading and cement content on mechanical properties of mortar was evaluated. 12 mortar mixes including 3 sand-cement mortars and 3 sand-lime-cement mortars with fine and coarse sand was considered. Based on ASTM standard, samples were prepared to determine compression strength, flexural strength and modulus of elasticity of each mortar mix. Test results were employed to find compression strength versus flexural strength and compression strength versus elastic modulus relationships. Results showed that compression and flexural strength of mortar with fine and coarse sand is reduced by lower cement content; furthermore, mortars with fine sand has considerably less compression and flexural strength comparing to similar mortar with coarse sand.

Keywords: Mortar, Cement Content, Sand Grading, Mechanical Properties.

۱- مقدمه

آمارهای موجود حاکی از آن است که بیش از نیمی از واحدهای مسکونی معمول در کشور را ساختمان‌های بنایی تشکیل می‌دهند. در سال ۱۳۸۵، نزدیک به ۶۵ درصد یعنی حدود دوسوم ساختمان‌های مناطق شهری از جنس آجر و ملات بوده‌اند [1]. از این رو، کیفیت ملات و شناخت مشخصات مکانیکی و فیزیکی آن در عملکرد، پایداری و دوام سازه و همچنین شناخت مناسب رفتار دیوارهای بنایی نقش بسیار مؤثری دارد. تعداد محدودی مطالعات و پژوهش به تأثیر دانه‌بندی ماسه و مقدار عیار سیمان بر روی مشخصات مکانیکی ملات تازه و سخت شده وجود دارد. به همین دلیل این پژوهش روی تأثیر دانه‌بندی ماسه و عیار سیمان بر مشخصات مکانیکی ملات متمرکز شده است. برخی از پژوهش‌های مرتبط با این تحقیق به شرح زیر است:

در ابتدا مهندسان سازه زلاندنو و کانادا مطالعاتی درباره سازه‌های بنایی انجام دادند. کارهای این پژوهشگران در سه کنفرانس نخستین مصالح بنایی آمریکای شمالی و ششمین و هفتمین سمپوزیوم مصالح بنایی کانادا ارائه شد [2].

در سال ۱۹۸۷، لارنس و کاو تلاش‌هایی برای دریافتن سازوکار گسترش چسبندگی بین ملات و آجر انجام دادند. این بررسی‌ها نشان دادند که چسبندگی ملات به آجر، به دلیل محصولات ناشی از هیدراتاسیون سیمان و نفوذ آن داخل منافذ و حفره‌های آجر است. همچنین رطوبت داخلی آجر در جذب محصولات هیدراتاسیون سیمان به داخل حفره‌های آجر نقش مؤثری دارد [3].

در سال ۱۹۹۵، ونومادهاواراو و همکاران روی اثر مقاومت چسبندگی بر مقاومت فشاری مصالح آجرکاری انجام دادند. نتیجه این بررسی نشان داد که مقاومت فشاری آجرکاری، حتی زمانی که مقاومت ملات پایین باشد، در صورتی که مقاومت چسبندگی ملات-آجر تغییری نکند، به میزانی قابل توجه کاهش پیدا نمی‌کند [4].

در سال ۲۰۰۷، ردی و گوپتا تأثیر دانه‌بندی ماسه را با گرفتن سه دانه‌بندی مختلف مشخصات مکانیکی ملات و مصالح بنایی را بررسی کردند. در این تحقیق، آزمایش‌های فشاری و خمشی و روانی نمونه ملات و مقاومت کششی اتصال و مقاومت فشاری منشور آجرکاری انجام شده است و نتایج آن نشان داد که: ۱- برای رسیدن ملات دارای ماسه ریز به ثبات و کارایی، به ۲۵ الی ۳۰ درصد آب بیشتر نیاز است. ۲- با ریزتر شدن دانه‌بندی ماسه در ملات، مقاومت فشاری و مدول آن کاهش می‌یابد. ۳- ملات با ماسه ریز مقاومت کششی اتصال مصالح بنایی را کاهش می‌دهد و همچنین مقاومت فشاری منشور بنایی به دانه‌بندی ماسه حساس نیست. ۴- مدول منشور بنایی با ریزتر شدن دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در ملات، کاهش می‌یابد [5].

در سال ۲۰۱۵، آباگانا و همکاران اهمیت دانه‌بندی ماسه را روی مقاومت فشاری و سخت شدگی ملات‌های ماسه آهکی در مقیاس کوچک آزمایشگاهی بررسی و مطالعه کردند. در این تحقیق با هفت نوع دانه‌بندی مختلف، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته و ضریب پواسون ملات را در نسبت‌های مختلف آب به سیمان مورد بررسی قرار دادند [6].

با توجه به پیشینه تحقیق فوق باید توجه داشت که مصالح مصرفی، شیوه‌های اجرایی و فناوری بخش ساختمان در کشورهای مختلف متفاوت است و نمی‌توان به‌طور مستقیم از نتایج کارهای صورت گرفته در سایر کشورها، استفاده کرد. از این رو پژوهش حاضر می‌تواند در جهت شناخت رفتار ملات‌هایی که مطابق با ضوابط فنی و اجرایی کشور ما ساخته شده است به‌طور شایان توجهی مؤثر واقع شود.

۲- برنامه آزمایشگاهی

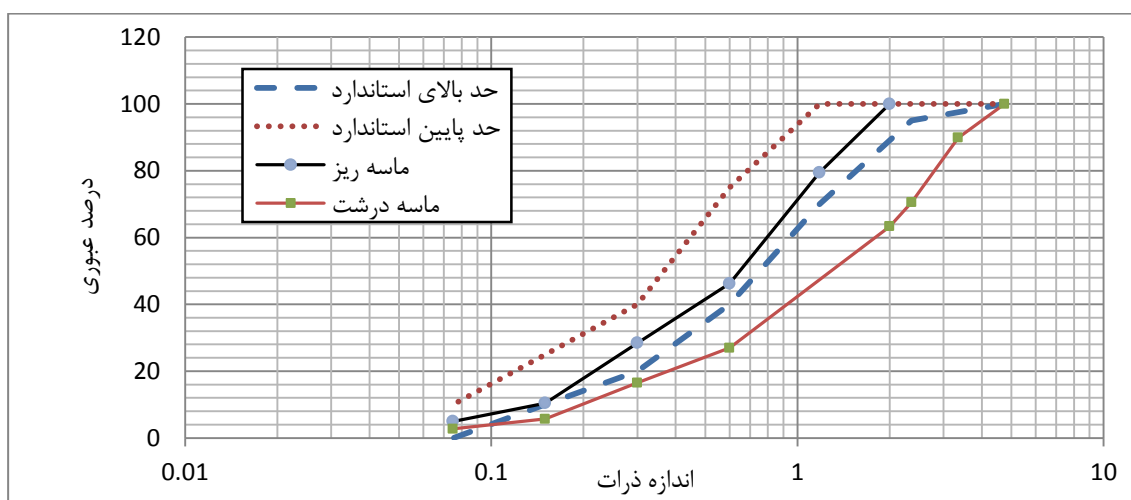
۲-۱ مصالح مصرفی

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان فارس-خوزستان با مشخصات جدول ۱ و همچنین آهک استاندارد استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند تپ ۲ کارخانه سیمان فارس-خوزستان

| ترکیبات شیمیایی | درصد وزنی |
|---|-----------|
| CaO | ۶۳/۲۴ |
| SiO ₂ | ۲۱/۵۴ |
| Al ₂ O ₃ | ۴/۹۵ |
| Fe ₂ O ₃ | ۳/۸۲ |
| MgO | ۱/۵۵ |
| SO ₃ | ۲/۴۳ |
| L.O.I ^۱ (کسر وزن در اثر سرخ شدن) | ۱/۱۵ |

همچنین ریزدانه مصرفی جهت ساخت ملات‌ها از ماسه طبیعی شسته ۰-۶-۰ معدن دوکوهک شیراز انتخاب شد. شش حالت ترکیب ملاتی با نسبت‌های ۱:۳ و ۱:۴ و ۱:۵ (ماسه:سیمان پرتلند) و ۱:۶:۱ و ۱:۸:۱ و ۱:۱۰:۱ (ماسه:آهک:سیمان پرتلند) که در هر ترکیب از دو نوع ماسه بانام‌های ماسه ریز و ماسه درشت با منحنی دانه‌بندی شکل ۱ استفاده شد. ماسه ریز دارای مدول نرمی ۲/۳ و با بیشینه قطر ۲ میلی‌متر که در محدوده دانه‌بندی استاندارد [7]ASTM C144 قرار دارد و ماسه درشت با مدول نرمی ۳/۲۷ با بیشینه قطر ۴/۷۵ میلی‌متر است. جدول ۲ مشخصات ترکیب‌های ملات را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد. نسبت آب به سیمان مصرفی برای ساخت ملات‌ها بر مبنای دستیابی به روانی استاندارد 110 ± 5 طبق استاندارد [8] ASTM C109 و [9] ASTM C348 انتخاب شد.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی ماسه ریز و درشت

جدول ۲: ترکیب اجزای انواع ملات‌ها

| ترکیب | نوع ماسه | نسبت آب به سیمان |
|------------------|----------|------------------|
| (ماسه:سیمان) | ۱:۳ | ۰/۷۷ |
| | درشت | ۰/۶۵ |
| | ۱:۴ | ۰/۹۷ |
| | درشت | ۰/۸۵ |
| (ماسه:آهک:سیمان) | ۱:۵ | ۱/۱ |
| | درشت | ۱ |
| | ۱:۱:۶ | ۲ |
| | درشت | ۱/۷ |
| (ماسه:آهک:سیمان) | ۱:۱:۸ | ۲/۳ |
| | درشت | ۲ |
| | ۱:۱:۱۰ | ۲/۸۵ |
| | درشت | ۲/۵ |

۲-۲ ساخت و آماده‌سازی نمونه‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر نوع ماسه (دانه‌بندی)، نسبت ماسه به سیمان در ملات‌های سیمانی و نسبت ماسه به سیمان و آهک در ملات‌های سیمانی-آهکی بر روی مقاومت فشاری و خمشی و مدول ارتجاعی ملات به روش آزمایشگاهی ۱۲ گروه از نمونه‌های ملات مطابق استاندارد به شرح زیر ساخته شد.

مقاومت فشاری ملات‌ها با نمونه‌های مکعبی ۵۰ میلی‌متری (شکل ۳) طبق استاندارد ASTM C109 [8] به دست آید. طبق این استاندارد ملات در سه لایه و با ۳۲ ضربه کوبه استاندارد ریخته می‌شود. در این پژوهش برای هر حالت ذکرشده تعداد ۴ عدد نمونه فشاری ساخته شد و میانگین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز نمونه‌ها به‌عنوان مقاومت فشاری در نظر گرفته شد.

برای تعیین مقاومت خمشی ملات از قالب‌های ۱۶۰*۴۰*۴۰ میلی‌متری (شکل ۴) طبق استاندارد ASTM C348 [9] استفاده شد. طبق این استاندارد ملات در سه مرحله در قالب ریخته و سپس متراکم می‌شوند. در این پژوهش نیز برای هر حالت ۳ عدد نمونه خمشی ساخته شد و میانگین نمونه‌ها در سن ۲۸ روز به‌عنوان مقاومت خمشی در نظر گرفته شد.

همچنین برای محاسبه مدول ارتجاعی و رسم نمودار تنش-کرنش ملات‌ها از نمونه‌های استوانه‌ای ۱۵۰*۳۰۰ میلی‌متری طبق استاندارد ASTM C469 [10] استفاده شد. در این تحقیق تعداد ۲ نمونه برای هر حالت ساخته شد؛ و برای رسم نمودار تنش-کرنش از محفظه تعیین مدول ارتجاعی با ساعت آنالوگ با دقت ۲ هزارم استفاده شد.

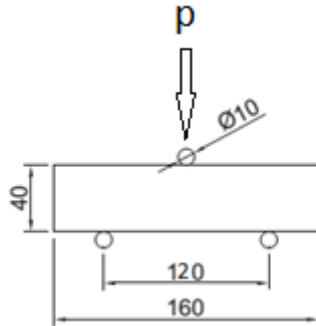
برای ساخت نمونه‌ها نسبت‌های ماسه و سیمان و آهک به‌صورت حجمی انتخاب شدند. در ساخت نمونه‌ها، پس از پیمانه کردن مصالح، اجزای متشکل ملات باهم ترکیب و سپس مخلوط به‌دست‌آمده مطابق استاندارد قالب‌گیری شدند. پس از قالب‌گیری، نمونه‌ها در محیط مرطوب به مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌شدند. بعداً این مدت، نمونه‌ها از قالب خارج و در ظرف آب با دمای ثابت به مدت ۲۸ روز نگهداری گشتند. مقاومت فشاری نمونه‌ها از تقسیم بیشینه بار بر سطح مقطع ملات به دست می‌آید. ابعاد ملات‌ها در هر دو حالت فشاری و خمشی و استوانه‌ای از طریق کولیس با دقت صدم میلی‌متر اندازه‌گیری شد و ابعاد با میانگین-گیری به دست می‌آید. مقاومت خمشی ملات بر اساس استاندارد و طبق جزئیات بارگذاری شکل ۲ با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران

تهران - ۱۵ مهرماه ۱۳۹۵

$$\text{مقاومت خمشی} = 1.5 \frac{Pl}{bh^2}$$

که در اینجا P = بیشینه بار، l = طول دهانه، b = عرض نمونه و h = ارتفاع نمونه است.



شکل ۲: جزئیات بارگذاری نمونه خمشی



شکل ۴: قالب خمشی

شکل ۳: قالب فشاری



شکل ۵: نمونه‌های فشاری و خمشی

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری میانگین مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مدول ارتجاعی فشاری نمونه‌ها در جدول ۳ خلاصه شده است.

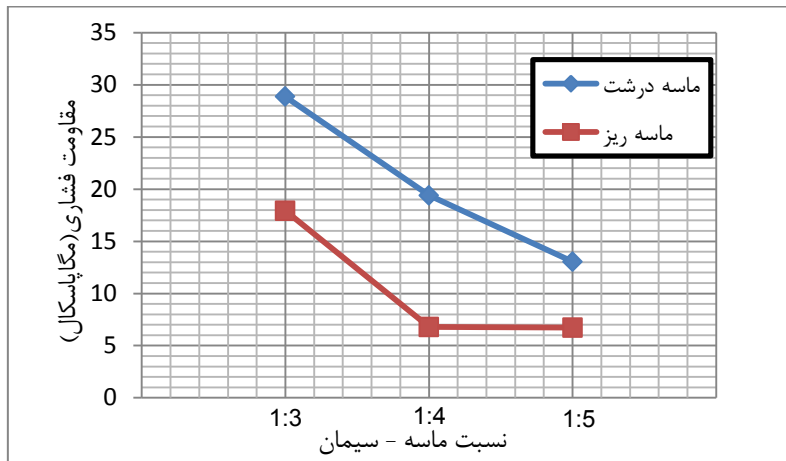
جدول ۳: نتایج مقاومت مکانیکی انواع ملات‌ها

| ترکیب | نوع ماسه | میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی (مگا پاسکال) | میانگین مقاومت خمشی (مگا پاسکال) | مدول ارتجاعی (گیگا پاسکال) | میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای (مگا پاسکال) |
|--------|----------|---|--|-------------------------------|--|
| ۱:۳ | درشت | ۲۶/۸۶ | ۵/۷۸ | ۱۹/۸۶ | ۱۸/۰۲ |
| | ریز | ۱۷/۹۲ | ۵/۱۱ | ۱۴/۸۱ | ۱۷/۰۹ |
| ۱:۴ | درشت | ۱۹/۴ | ۵/۲۷ | ۱۸/۹۹ | ۸/۲۳ |
| | ریز | ۶/۷۸ | ۳/۴۱ | ۱۳/۵۵ | ۹/۱۷ |
| ۱:۵ | درشت | ۱۳/۰۵ | ۳/۹۸ | ۱۵/۶۳ | ۱۰/۲۸ |
| | ریز | ۶/۷۳ | ۲/۷۴ | ۱۱/۷۱ | ۷/۵۵ |
| ۱:۱:۶ | درشت | ۳/۱۱ | ۱/۳ | ۶/۳۹ | ۲/۹۴ |
| | ریز | ۲/۶۵ | ۰/۶۴ | ۳/۶۱ | ۱/۷۷ |
| ۱:۱:۸ | درشت | ۲/۲۹ | ۰/۵۲ | ۴/۷۳ | ۱/۶۹ |
| | ریز | ۲/۴۹ | ۰/۸۱ | ۲/۹۴ | ۱/۵۱ |
| ۱:۱:۱۰ | درشت | ۱/۵۸ | ۰/۵۷ | ۲/۹ | ۱ |
| | ریز | ۱/۴۳ | ۰/۴۸ | ۲/۴۴ | ۰/۹۹ |

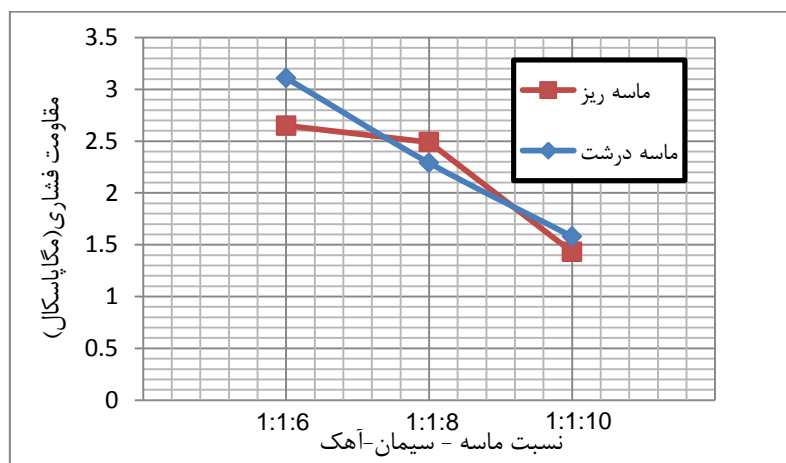
نتایج جدول ۳ مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های ملات ساخته‌شده با ماسه ریزودرشت برای ملات‌های سیمانی و آهکی نشان می‌دهد که همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش نسبت ماسه به سیمان (کاهش عیار سیمان)، مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین ملات‌های با ماسه ریز به مراتب مقاومت فشاری و خمشی کمتری نسبت به عیار مشابه در ملات‌هایی با دانه‌بندی درشت دارند که این نتیجه فقط در حالت ملات ماسه سیمان آهکی ۱:۱:۸ مشاهده نمی‌شود که این اثر می‌تواند به دلیل افزایش تخلخل دانه‌ها در این ترکیب خاص ناشی از مقدار آب موردنیاز بالا برای عمل هیدراتاسیون سیمان باشد در نمودارهای شکل ۶ تا ۹ مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمانی و ملات سیمانی-آهکی برای ماسه درشت و ریز مقایسه می‌شود.

هشتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران

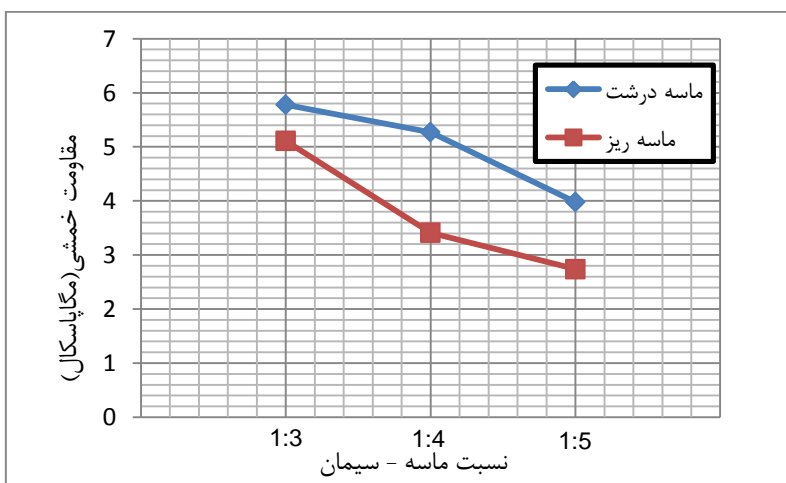
تهران - ۱۵ مهرماه ۱۳۹۵



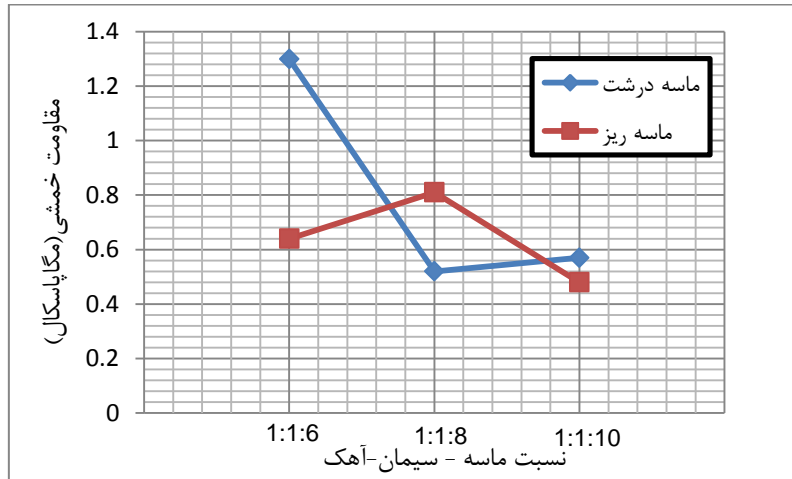
شکل ۶: نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات ماسه-سیمانی



شکل ۷: نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ملات ماسه-سیمانی-آهکی

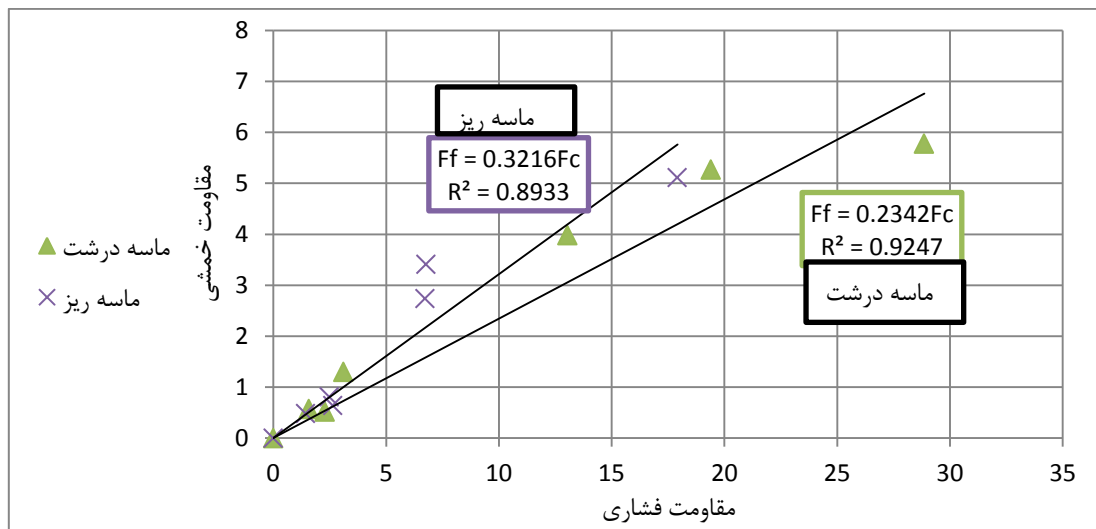


شکل ۸: نمودار مقاومت خمشی ملات ماسه-سیمانی



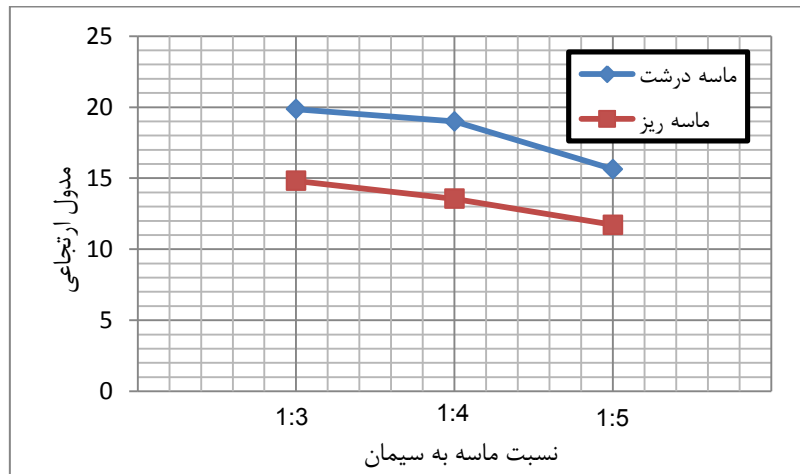
شکل ۹: نمودار مقاومت خمشی ملات ماسه-سیمانی-آهکی

حال با توجه به نتایج مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌های ملات یک ارتباط تقریباً خطی با ضریب همبستگی مناسبی بین مقاومت خمشی و فشاری نمونه‌ها مطابق شکل ۹ برای تمامی ملات‌ها وجود دارد.

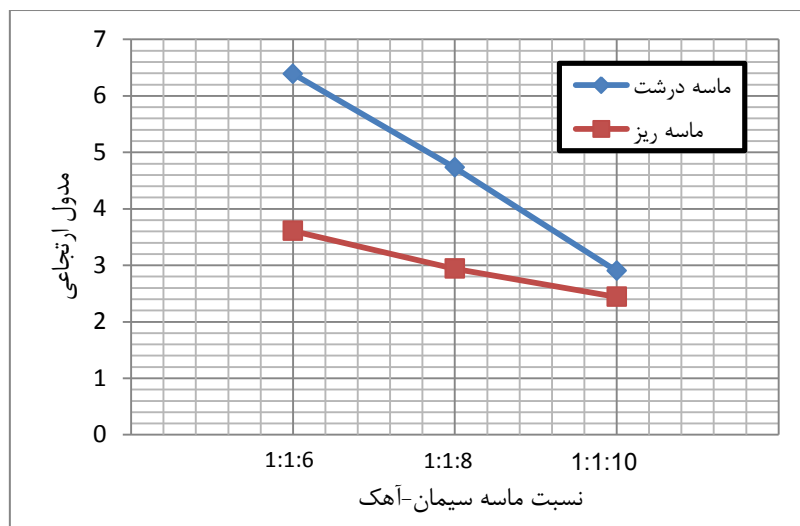


شکل ۱۰: رابطه بین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و خمشی ملات

با مقایسه مدول ارتجاعی به دست آمده می‌توان دریافت که ملات‌های با ماسه درشت در هر دو نوع ملات، مدول ارتجاعی بیشتری نسبت به ماسه ریز دارند و مدول ارتجاعی نیز با افزایش نسبت ماسه به سیمان (کاهش عیار سیمان)، کاهش می‌یابد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تغییرات مدول ارتجاعی برحسب عیار ملات را نشان می‌دهند.

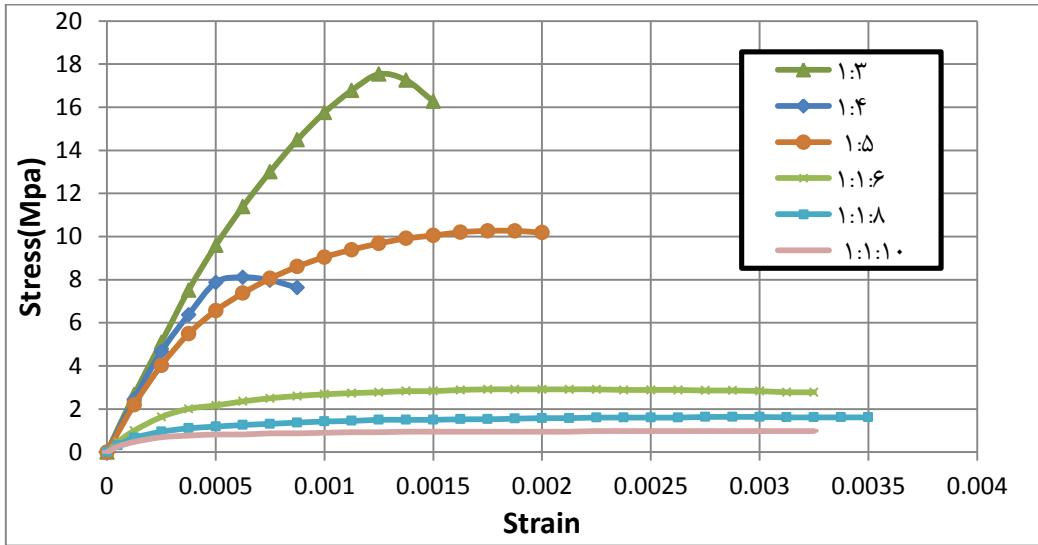


شکل ۱۱: نمودار مدول ارتجاعی ملات ماسه-سیمانی

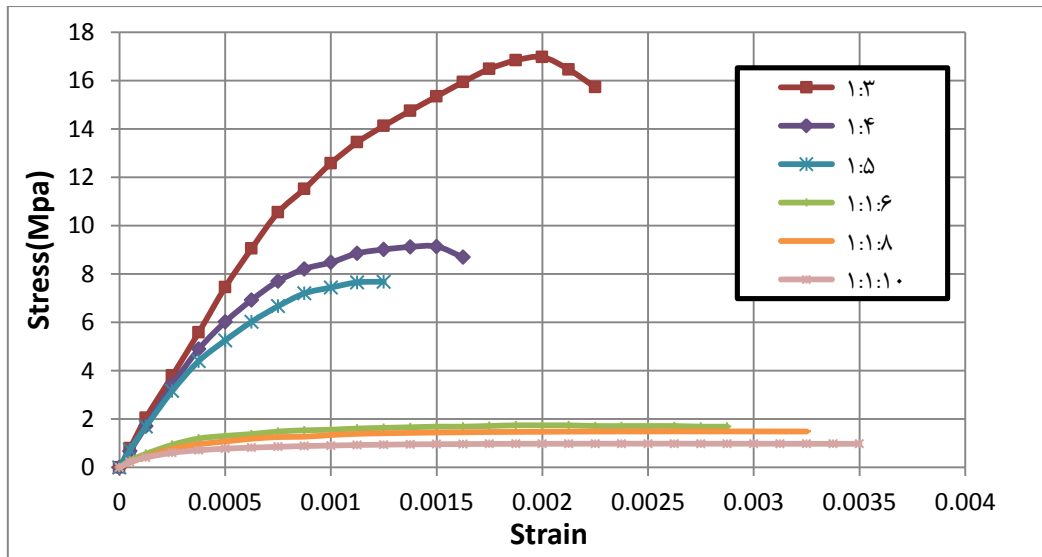


شکل ۱۲: نمودار مدول ارتجاعی ملات ماسه-سیمانی-آهکی

نمودار تنش-کرنش انواع ملات در شکل ۱۳ و ۱۴ مشاهده می‌شود. از مقایسه نمودارها می‌توان دریافت که بیشینه کرنش نمونه‌ها با کاهش عیار سیمان در هر دو نوع ماسه، کاهش پیدا می‌کند؛ و ملات‌های ماسه سیمانی و ماسه سیمانی-آهکی در هر دو نوع ماسه رفتار پس از اوج کاملاً متفاوتی دارند به طوری که ملات‌های آهکی نمودارهای صافی در رفتار پس از رسیدن به اوج دارند.

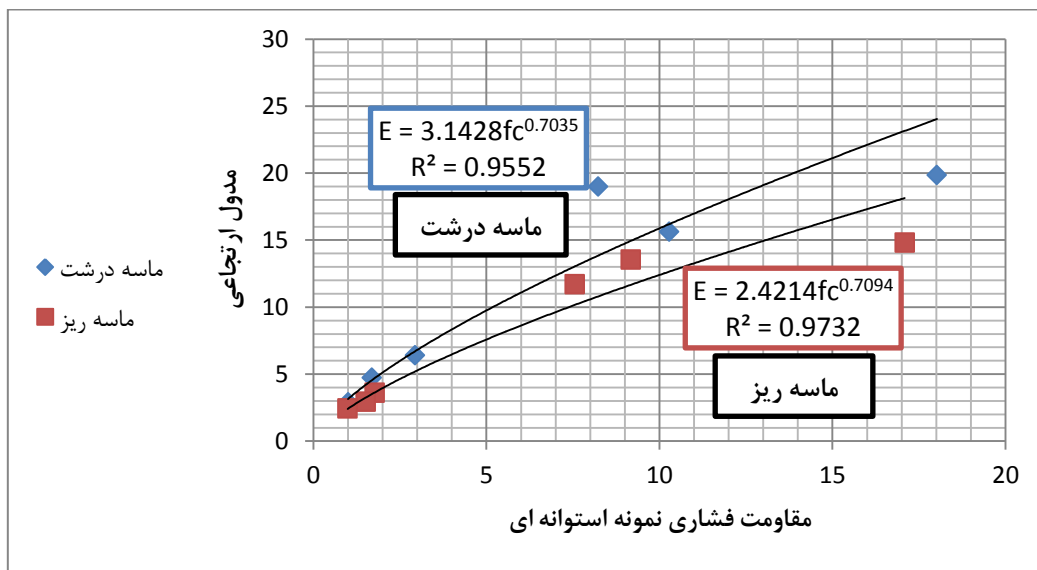


شکل ۱۳: نمودار تنش- کرنش ملات با ماسه درشت

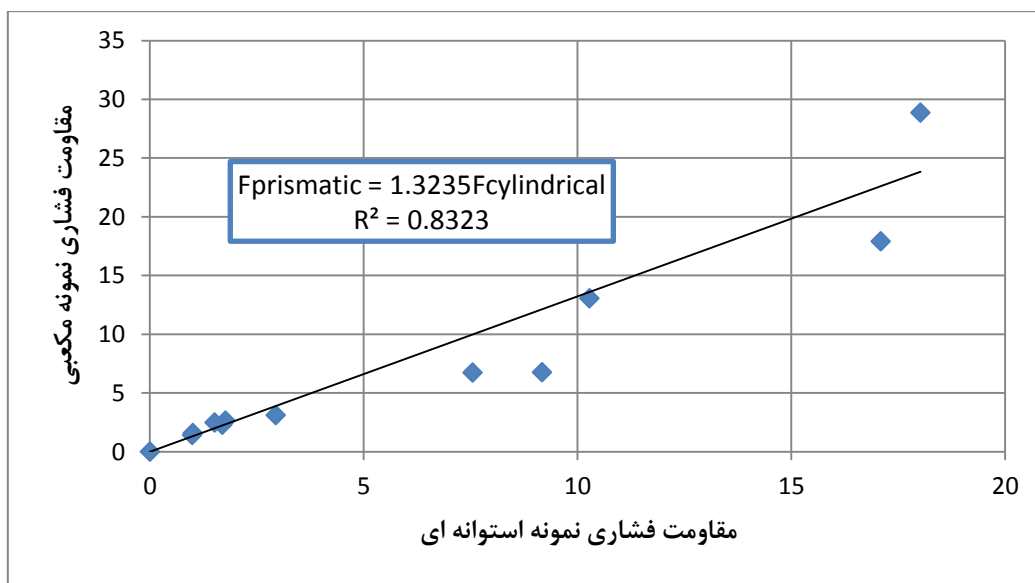


شکل ۱۴: نمودار تنش- کرنش ملات با ماسه ریز

حال با توجه به نمودار تغییرات مدول ارتجاعی برحسب مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای شکل ۱۵ و نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای شکل ۱۶ می‌توان یک تابع بین مقاومت فشاری و مدول ارتجاعی و یک رابطه خطی بین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای به دست آورد.



شکل ۱۵: نمودار مقاومت فشاری برحسب مدول ارتجاعی



شکل ۱۶: رابطه بین مقاومت فشاری نمونه مکعبی و استوانه‌ای

۴- نتیجه‌گیری

با مقایسه و جمع‌بندی نتایج حاصل در این مطالعه آزمایشگاهی موارد زیر به دست آمد:

- ۱- نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی و فشاری ملات نشان می‌دهد که مقاومت فشاری و خمشی ملات با کاهش عیار سیمان به ماسه در هر دو حالت سیمانی و آهکی کمتر می‌شود.
- ۲- هرچه ماسه مورد استفاده در ساخت ملات ریزدانه‌تر شود مقاومت مکانیکی ملات (مقاومت فشاری و خمشی) به دلیل پیوستگی کمتر ذرات و همچنین مقاومت کمتر ذرات سنگ‌دانه، کاهش می‌یابد.
- ۳- مقاومت فشاری ملات ماسه سیمانی حساسیت بیشتری به ریزی ماسه نسبت به ملات ماسه سیمانی-آهکی دارد.

۴- ملات‌های ساخته‌شده با آهک به‌طور قابل‌توجه مقاومت فشاری و خمشی کمتری نسبت به ملات‌های ماسه سیمانی دارند.

۵- مقاومت فشاری و خمشی ملات‌ها با ماسه درشت در این پژوهش به ترتیب حدود ۲۳ درصد و ۳۲ درصد بیش از مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ملات‌های با ماسه ریز است.

۶- مدول ارتجاعی و کرنش بیشینه متناظر در تنش‌نهایی در هر دو نوع ملات برای ماسه درشت بیش از ماسه ریز است.

۷- مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی تقریباً ۱/۳ برابر مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای است.

مراجع

- [۱] مرکز آمار ایران؛ اطلاعات پروانه‌های ساختمان صادرشده توسط شهرداری‌های کشور؛ ۱۳۸۵.
- [2] Sarangapani, G., Venkatarama Reddy, B. V., and Jagaadish, "Brick-Mortar Bond and Masonry Compressive Strength" *Journal of Materials in Civil Engineering*; ASCE; March/April 2005.
- [3] Lawrence SJ, Cao HT. Microstructure of the interface between brick and mortar. In: *Proceedings of the eighth international brick/block masonry conference*; 1988. p. 194–204.
- [4] Venu Madhava Rao K, Venkatarama Reddy BV, Jagadish KS. Flexural bond strength of masonry using various blocks and mortars. *Mater Struct (RILEM)* 1996;29:119–24.
- [5] Reddy BVV, Gupta A. "Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry". *Construct Build Mater* 2008;22(8):1614–23.
- [6] Abbagana M, Tim GH, Aliyu A. "Importance of Sand Grading on the Compressive Strength and Stiffness of Lime Mortar in Small Scale Model Studies." *Open Journal of Civil Engineering* 2015;372(78).
- [7] ASTM C144-03 "Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar"; American Society for Testing and Materials; 2003.
- [8] ASTM C109-07 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars". American Society for Testing and Materials; 2007.
- [9] ASTM C348-02 "Standard Test Method for flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars" American Society for Testing and Materials; 2002.
- [10] ASTM C469-07 "Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression" American Society for Testing and Materials; 2007.